

УДК 621.375:625.325

М.Ю.Погорельский (5 курс, каф. ТТЭ),
А.Н.Алексеев, к.ф.н., ЗАО “Научное и технологическое оборудование”, С.-Петербург

0.94 мкм МОЩНЫЕ НИЗКОПороГОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ДИОДЫ НА ОСНОВЕ $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ГЕТЕРОСТРУКТУР, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МВЕ

Мощные лазерные диоды на основе $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ гетероструктур, излучающие в спектральном диапазоне 0.96...0.98 мкм, широко используются для накачки ионов Er^{3+} в твердотельных лазерах и волоконно-оптических усилителях и имеют высокую эффективность, надежность и время жизни [1]. С другой стороны, для ряда приложений (например, для накачки твердотельных лазеров на основе ионов Yb^{3+} с максимумом поглощения в диапазоне 0.94...0.95 мкм) необходимо увеличивать энергию кванта излучения и соответственно уменьшать концентрацию In в активной области.

Напряженные гетероструктуры с отдельным электронным и оптическим ограничением и волноводом переменной структуры (graded index), оптимизированные для получения мощных лазерных диодов с низкой пороговой плотностью тока, низкими внутренними потерями и высокой дифференциальной квантовой эффективностью, выращены на отечественной установке ЭП1203, в конструкцию которой внесены ряд изменений, позволяющих получать воспроизводимые результаты для данного типа гетероструктур, а именно:

использование модернизированного узла нагрева подложки, облегчающего прохождение гетерограниц при существенной разнице ростовых температур, материала волновода – AlGaAs (~ 700eC) и активной области – InGaAs (540– 560eC);

использование специально разработанной конструкции безиндиевого держателя подложки, обеспечившего высокую однородность параметров слоев по площади структуры;

использование источника Ga с квазидвухзонным нагревателем тигля, обеспечивающее существенное уменьшение плотности овальных дефектов на поверхности структуры и, как следствие, к увеличению сквозного выхода годных.

Оптимизация технологии роста заключалась в выборе ростовых параметров InGaAs активной области – температуры, скорости роста и отношения потоков компонент V и III групп.

Выращенные структуры имеют следующие особенности [2].

Структуры выращены на (100) подложках GaAs , легированных Si, и имеют классическую конструкцию, в которой внутри $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.6$) эмиттеров заключен волноводный слой (GRIN) с $x=0.6 \rightarrow 0.3 \rightarrow 0.6$ суммарной толщиной 0.3мкм, в котором, в свою очередь, помещена $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y=0.1$) активная область толщиной 9 нм, окруженная слоями GaAs толщиной по 3 нм.

В качестве легирующих примесей для материала n-типа использовался Si, p-типа – Be. Профиль легирования эмиттерных слоев был оптимизирован с целью минимизации внутренних оптических потерь (концентрация примесей в волноводе снижена на 2 порядка по сравнению с эмиттерами).

В напряженной $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ гетероструктуре материал испытывает упругое биаксиальное сжатие без генерации дислокаций несоответствия, что расщепляет подзоны легких и тяжелых дырок в валентной зоне. Это уменьшает эффективную массу дырок в плоскости гетероперехода и эффективную плотность состояний в валентной зоне, что позволяет создать достаточную инверсную населенность для лазерного излучения при меньшем пороговом токе. Напряженные слои также препятствуют движению дефектов в активную область при работе прибора, увеличивая его время жизни.

Волновод типа GRIN имеет улучшенные оптические характеристики по сравнению с обычным и позволяет увеличить концентрацию носителей в квантовой яме.

Тонкие слои GaAs по обеим сторонам квантовой ямы необходимы по следующим причинам. Кислород часто является включением в слоях AlGaAs независимо от техники роста и скапливается вблизи активной области в AlGaAs/GaAs лазерах. Эмиттер и часть волновода AlGaAs, легированные Be, также обычно имеют более высокое содержание кислорода, чем легированные Si, что показано на тестовых структурах в работе [1]. Вставки GaAs отделяют возможные включения кислорода от квантовой ямы. Известно, что это позволяет улучшить характеристики лазеров [1].

Смещенный p–n переход:

1. В полупроводниковых лазерах существуют два типа дефектов, подвижные и неподвижные. В лазере обычной конструкции, где p–n переход находится внутри или на границе квантовой ямы, точечные дефекты (dark spot defects) и темные линии (dark line defects) движутся к p–n переходу, в результате в активной области увеличивается количество центров безизлучательной рекомбинации, что вызывает деградацию. В результате возрастает пороговая плотность тока и падает мощность и дифференциальная эффективность. В лазере со смещенным p–n переходом подвижные дефекты уходят из активной области под действием электрического поля p–n перехода. Деградация такого лазера определяется деградацией p–n перехода и может продолжаться, пока p–n переход не получает серьезных повреждений [3].

2. Во время роста p-типа AlGaAs (GRIN и покрывающий слой) при температуре 700°C происходит диффузия Be в активную область и дальше, что показано по результатам измерений SIMS в [1]. Это приводит к смещению p-n перехода в сторону подложки, протеканию тока неосновных носителей через активную область и, как следствие, к повышению пороговой плотности тока и снижению дифференциальной эффективности. Весь волновод (GRIN) и активная область легированы Si, что уменьшает содержание O в квантовой яме. Легирование Be начинается на нижней границе покрывающего p-слоя AlGaAs. В любом случае, происходит диффузия Be в GRIN, но он не приносит с собой кислород. Атомы O, если они присутствуют, объединяются с Be в процессе роста, но мало подвижны по сравнению с быстрой диффузией Be [1].

Методика контроля качества выращенных структур, изготовления лазерных диодов на их основе и определения их технических параметров приведены в [2].

Результаты моделирования конструкции показывают, что выращенные гетероструктуры имеют фактор оптического ограничения $\Gamma = 0.034$ и полуширину диаграммы направленности перпендикулярно p-n переходу $\theta = 40^\circ$, которая хорошо согласуется с экспериментально измеренной величиной.

Методом МВЕ в результате оптимизации технологии роста и профиля легирования получены низкороговые ($J_{th}^0 = 70 \text{ A/cm}^2$) $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As/AlGaAs/GaAs}$ ЛГС, обладающие высоким внутренним квантовым выходом ($\eta_{int} = 98\%$) и рекордно низкими оптическими потерями ($\alpha_{int} = 1.5\text{cm}^{-1}$). На их основе изготовлены лазерные диоды, имеющие максимум излучения в диапазоне $945 \pm 5 \text{ нм}$, имеющие высокую дифференциальную квантовую эффективность ($\eta > 65\%$), низкую плотность порогового тока ($J_{th} = 100 \text{ A/cm}^2$) и время жизни более 10 000 ч. Полуширина спектров генерации не превышает 1.5 нм. Разработанная технология позволяет устойчиво получать ЛГС с параметрами, обеспечивающими изготовление низкороговых долгоживущих лазерных диодов мощностью 1 W при излучающей площадке 100 мкм. Повышение предельной оптической мощности требует, с одной стороны, изменения конструкции в сторону расширения волновода и, с другой, – совершенствования ряда постростовых операций.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chand N. et al // IEEE J. of Quant. Elect. 1994 Vol.30 No.2 p.424– 440
2. Александров С.В., Алексеев А.Н. и др.// Письма в ЖТФ, 2002, том 28, вып. 16, стр.71–78
3. Guijun H. et al // Optics & Laser Technol. 33 (2001) p.231– 235